

DOI: 10.11766/trxb202205160256

宋颖, 徐贇欣, 王佳凡, 高明秀. 黄河故道流域土壤盐渍化多维空间特征及其风险评价[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 372–394.

Song Ying, Xu Zexin, Wang Jiafan, Gao Mingxiu. Multidimensional Spatial Characteristics and Risk Assessment of Soil Salinization in the Old Yellow River Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 372–384.

黄河故道流域土壤盐渍化多维空间特征及其风险评价*

宋颖¹, 徐贇欣¹, 王佳凡¹, 高明秀^{1, 2†}

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2. 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东泰安 271018)

摘要: 掌握土壤盐渍化多维空间分布特征, 分析盐渍化风险影响因素, 实行风险区域分区管控, 提升盐碱土利用效率。以山东省东营市河口区黄河故道流域为研究区, 采用经典统计学方法对土壤盐渍化状况进行描述性统计, 基于 GIS 插值对研究区盐渍化的二维空间分布格局进行分析, 运用 GIS 三维反距离权重插值可视化分析盐分三维空间分布及其变化趋势, 构建土壤盐渍化风险评价模型定量分析其风险程度。结果表明: 研究区土壤含盐量均值为 $5.84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 整体属于重度盐渍化, pH 均值为 7.82, 呈弱碱性; 二维空间上, 土壤含盐量高值区域 ($\geq 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 主要分布于研究区北部, 整体呈现从沿海向内陆降低的趋势, 土壤盐分与 pH 分布趋势整体呈负相关; 三维空间上, 土壤盐分剖面分布特征整体以均质型为主, 局部存在表聚、两端集聚, 呈表聚型、均质型、两端集聚型三种类型共存的复杂特征; 盐渍化风险程度分为 4 级, 极高风险区域主要分布于研究区中北部、东北部; 高风险区域主要分布在研究区中部及东北部区域, 中风险区域主要分布在研究区西部、东南部, 低风险区域主要分布于研究区西南部。应预防极高风险区、控制高风险区、改良中低风险区, 以最大程度减轻盐渍化风险危害。

关键词: 土壤盐渍化; 空间特征; 多维分析; 风险评价; 黄河故道

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

Multidimensional Spatial Characteristics and Risk Assessment of Soil Salinization in the Old Yellow River Basin

SONG Ying¹, XU Zexin¹, WANG Jiafan¹, GAO Mingxiu^{1, 2†}

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to grasp the multidimensional spatial distribution characteristics of soil salinization, analyze the factors influencing salinization risk, implement risk area zoning control and improve the efficiency of saline land use.

【Method】 In this study, the Yellow River old riverway in Hekou District, Dongying City, Shandong Province, was selected as the

* 山东省自然科学基金项目 (ZR2021MD018)、国家重点研发计划子课题 (2021YFD190090101)、山东省农业科技园区产业提升工程项目 (2019YQ014) 资助。Supported by the National Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2021MD018), Sub Project of National Key R&D Plan (No.2021YFD190090101) and Industrial Upgrading Project of Shandong Agricultural Science and Technology Area (No.2019YQ014) .

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mxgao@sdau.edu.cn

作者简介: 宋颖 (1998—), 男, 云南麻栗坡人, 硕士研究生, 主要从事土地利用与保护研究。E-mail: 554632332@qq.com

收稿日期: 2022-05-16; 收到修改稿日期: 2023-03-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-09-26

study area. Descriptive statistics on soil salinization status were conducted using classical statistical methods, the two-dimensional spatial distribution pattern of salinization in the study area was analyzed based on GIS interpolation, the three-dimensional spatial distribution of salinity and its change trends were visualized using GMS three-dimensional inverse distance weight interpolation, and a soil salinization risk evaluation model was constructed to quantitatively analyze the risk.

【Result】 The results show that the average salinity of the soil in the study area was $5.84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, representing severe salinization; and the average pH value was 7.82, indicating weakly alkaline. In two-dimensional space, the areas with high salinity ($> 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) were mainly located in the north of the study area, and the overall trend was decreasing from the coast to the inland. In three-dimensional space, the distribution characteristics of the soil salinity profile were mainly homogeneous, with local surface aggregation and clustering at both ends, showing a complex coexistence of three types: surface aggregation, homogeneous, and clustering at both ends. The risk degree of salinization was divided into four levels and the extremely high-risk areas were mainly distributed in the north-central and northeast of the study area. Also, high-risk areas were mainly distributed in the middle and northeast, moderate-risk areas in the west and southeast, and low-risk areas in the southwest of the study area. **【Conclusion】** We recommend that the following measures should be employed to minimize the risk of salinization and improve the efficiency of resource utilization: preventive measures in extremely high-risk areas, control measures in high-risk areas, and improvement measures in moderate and low-risk areas.

Key words: Soil salinization; Spatial characteristics; Multidimensional analysis; Risk assessment; The Yellow River old riverway

土壤盐渍化是土地退化最常见的形式和驱动因素之一，导致土地生产能力下降，影响农业生产以及区域生态安全^[1-3]。全球气候变暖使得滨海区的蒸散过程更为频繁，海平面持续上升致使沿海区域盐渍化程度更为严重^[4]。目前，盐渍土广泛分布于全球 100 多个国家和地区，总面积达 9.5 亿 hm^2 ，并以每年 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的速度增长^[5-7]。中国盐渍土总面积 9 913 万 hm^2 ，也存在上升趋势^[8-9]。因此，充分了解区域盐渍化现状，分析区域盐渍化风险，对于科学治理利用盐渍土资源，提高土地生产力和改善生态具有重要意义^[10]。山东省东营市河口区地处黄河故道流域，历史上黄河多次改道在此入渤海，黄河泥沙沉积造陆。这里是黄河三角洲的重要组成部分，盐渍土资源丰富，具有巨大的开发潜力^[11-12]。该区地下水埋深较浅，土壤盐渍化程度在空间上分布不均匀，水盐空间变异情况较为复杂^[13]，对其土地资源可持续利用造成了严重的阻碍。及时掌握黄河三角地区土壤盐分空间分布特征，评估盐渍化风险等级，有助于制定针对性措施，有效防控盐渍化，保障黄河流域土地利用效益和生态可持续发展^[14-15]。

土壤盐分二维空间分布特征分析主要基于确定性插值法和地统计插值法两类方法。地统计插值法主要有普通克里格法^[16]、协同克里格法^[17]以及指示克里格法^[18]等，克里格法的主要优点在于其插值结

果能量化已知点之间的空间自相关性，并获得误差表面，从而评估预测结果的不确定性，但其缺陷在于多要求数据呈正态分布^[19]；确定性插值方法主要包括全局多项式插值^[20]、径向基函数插值^[21]及反距离权重插值（Inverse distance weight, IDW）^[22]等，其主要优点在于以区域内部相似性（如 IDW）或以平滑度为基础，运用数学方法拟合已知点从而创建表面^[23]（全局多项式、径向基函数法），其中又以反距离权重插值法居多，对于空间分布散乱、不满足正态分布的数据进行插值时，反距离权重插值法更能反映区域和局部变化趋势^[24]。但通过二维土壤盐渍化分析不能准确、全面掌握研究区土壤盐渍化状况，三维可视化方法的引入有助于提高分析的深度。目前常用的土壤盐分三维空间插值方法包括三维普通克里格插值法与三维反距离权重插值法，前者插值结果多趋于平缓，避免了异常值的出现，而后者更容易受数据点之间的相互影响，着重强调原始数据的局部波动性，从而达到尊重实测数据值的效果^[24]。吴亚坤等^[25]通过获取电磁感应式表观土壤电导率，以三维反距离权重插值方法构建出典型干旱区土壤盐分分层精确解译模型；刘新路等^[26]利用 4 个不同时期的土壤电导率数据，采用三维反距离权重插值法实现了干旱区棉田土壤盐分的三维可视化。综观现有盐渍化三维空间分布研究，大多集中于新疆^[27]、长三角^[28]、河南^[29]等地，而对于黄河三

角洲等滨海区域的研究深度和广度均存在不足。在掌握区域土壤盐渍化多维空间分布的基础上,盐渍化风险评价是盐渍化趋势分析和管控的关键环节,逐渐成为许多学者关注的焦点。依力亚斯江·努尔麦麦提等^[30]基于灰色评估模型,以评价因子与土壤电导率的相关系数作为风险权重,评估了绿洲土壤盐渍化风险状况;Wang 等^[31]利用 RS 和 GIS 技术获取评价因子数据集,在相关系数分析确定评价因子风险权重的基础上,引入土壤盐渍化综合分级法进行风险评价;Seydehmet 等^[32]基于最大偏差法和 PSR 方法框架,以层次分析法确定风险参数权重,制定综合风险指数(CRI),评估了西北干旱绿洲盐渍化风险。总体来看,前人进行土壤盐渍化综合风险评价时,确定风险因子权重系数多采用灰色关联法^[30]、相关系数法^[31]与层次分析法^[32],忽略影响因素之间的非线性相关关系与过多的人为主观因素干预是目前确定权重系数的缺陷^[33],有待进一步优化。

本文拟以位于山东省东营市河口区的黄河故道流域为研究区,通过电导率与土壤含盐量关系解释不同深度层次土壤含盐量并统计分析其数量特征,基于反距离权重方法分析土壤盐渍化二维、三维空间分布特征,相关系数法结合因子探测法确定盐渍化风险因子权重,构建盐渍化风险评价指数定量评价盐渍化风险程度,旨在为黄河三角洲滨海区土壤

盐渍化防控提供理论基础与实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属于黄河故道流域,包括河口区全境和利津县刁口乡,地理坐标为 37°45′—38°10′N, 118°07′—119°05′E(图 1),位于山东省北部,渤海湾南岸,现黄河入海口北侧,东、北两侧临海,总面积 2 365 km²,土地利用类型以农用地与未利用地为主,未利用地开发潜力较大。属暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.4℃,年均降水 551.8 mm,降水季节分布不均,集中在夏季。境域属典型的黄河三角洲地貌,主要类型有缓岗和河滩高地、浅平洼地、微斜平地、海滩地,土壤质地主要为粉质和黏质,其中粉壤土约占总面积 30%^[34]。地势南高北低,西高东低,由内地向沿海平缓降低,自然比降为 1:10 000~1:15 000。海拔一般在 5~6 m,近海 2~3 m。地下水埋深小于 1 m 的地区呈带状分布于沿海地带,1~2 m 的地区分布于东部和北部、2~5 m 的地区分布于义和、六合等乡镇,5~7 m 的地区分布于西南部。境域古为渤海水域,在黄河泥沙淤淀成陆过程中,长期受海水浸渍,深层土壤多为重盐土。浅层地下除黄河故道部分区段有少量淡水外,其余大部分地区无淡水。

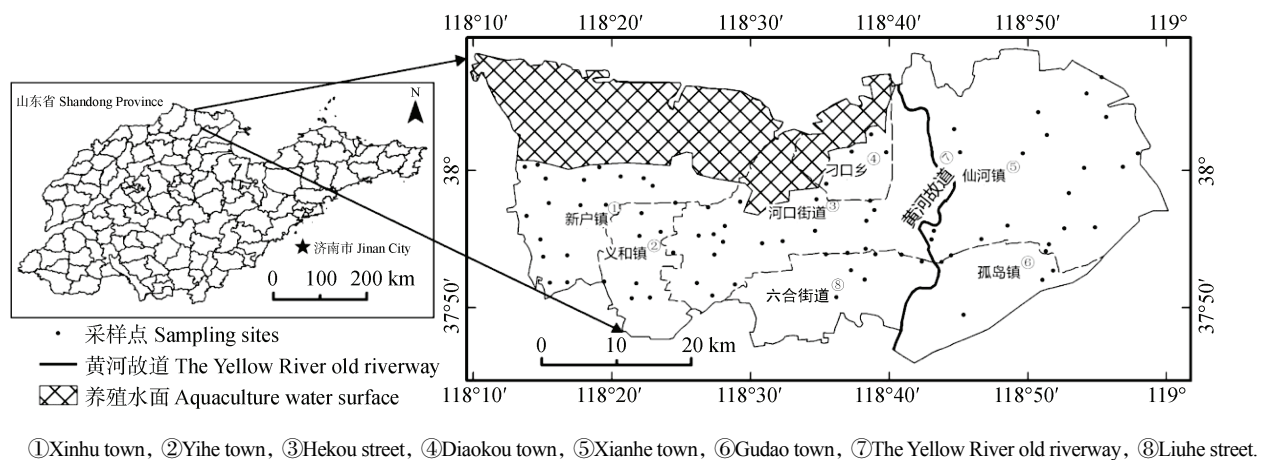


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 样品采集与分析

(1) 样品采集 样点布设采用网格法,在遥感影像图上以 3 km×3 km 网格覆盖研究区内土地(避

开滩涂、养殖水面后研究区总面积为 2 048 km²),每个网格中部设计一个采样点,实地调查时根据交通可达性和现场情况确定采样的具体地点。使用手

持式 GPS 记录样点坐标,并记录土地利用现状类型、覆盖度以及植物长势等。通过 EC110 电导率仪(量程 $0.00\sim 199.9\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 精度 $\pm 2\%$, 测深 52.5 cm) 分别测定距地表 2.5 、 7.5 、 15.0 、 22.5 、 30.0 、 37.5 、 45.0 、 52.5 cm 深度处电导率;用土钻钻取典型样点表层 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤样品各 2 份,一份密封用于测定土壤水分,另一份约 1 kg 用于分析土壤属性。调查在 2019 年 4 月 25 日—28 日进行,共采集样点数据 86 个,调查时处于春季,无明显降水,当年 1—4 月累计降水仅 47.2 mm 。

(2) 样品分析 土壤含水量采用 105°C 烘干称重法测定。其余样品在室温下自然风干,剔除植物残体等侵入体后研磨,分别制备过 2 mm 、 1 mm 和 0.25 mm 筛的样品,装袋备用。土壤质地采用吸管法测定;土壤含盐量采用 $5:1$ 水土比浸提液烘干法测定;pH 采用电导法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定^[35]。

1.3 数据获取

(1) 盐渍化风险评价指标选取 参照文献结合研究区特点,选取土壤有机质、质地、中层土壤含盐量、底层土壤含盐量(文中分别以 2.5 、 7.5 、 15 cm 土层, 22.5 、 30.0 、 37.5 cm 土层, 45.0 、 52.5 cm 土层盐分均值作为表层 $0\sim 20\text{ cm}$ 、中层 $20\sim 40\text{ cm}$ 、底层 $40\sim 60\text{ cm}$ 土壤含盐量)、地下水矿化度、距渤海距离、高程、坡度、地下水埋深、植被覆盖度、年平均降雨量、地表蒸散量共 12 个盐渍化风险影响因子构建盐渍化风险评价指标体系(表 1、图 2)。

(2) 遥感反演数据 选取与野外调查同时期的 GF1-WFV2(下载于地理空间数据云, <https://www.gscloud.cn/>) 光学遥感数据反演植被覆盖度数据并用野外记录校核;DEM 数据来自于 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据;坡度通过 DEM 数据反演得到;蒸散量数据来源于地理遥感生态网(<https://www.gisrs.cn/>)。

(3) 空间数据 土壤有机质、质地通过样品测定得到;各层土壤盐分通过土壤电导率 EC_0 与含盐量 $S_i(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 间的关系方程计算得到;地下水矿化度通过地方监测资料矢量化得到^[36-37];距渤海距离通过多环缓冲区空间插值得到;地下水埋深和 2019 年年平均降雨量数据通过国家地球系统科学数据中

心获取(<http://www.geodata.cn/>)。

1.4 数据分析

(1) 经典统计学方法。利用 SPSS23.0 软件,采用经典统计学方法分析土壤 pH、盐分的描述性统计特征;变异系数 CV 划分为弱 $[0, 10\%)$ 、中 $[10\%, 100\%)$ 、强 $[100\%, +\infty)$ 3 个变异程度等级^[39]。参照《中国盐渍土》分级标准,将盐渍化程度分为非盐渍、轻度、中度、重度和盐土五个级别,含盐量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 区间对应: $[0, 1)$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, 4)$ 、 $[4, 6)$ 、 $[6, +\infty)$ ^[40],研究区没有非盐渍化土,实际只涉及四个等级;由于常规依据 pH 划分碱性等级标准范围较宽不能反映研究区实际,因而利用 Arcgis10.2 重分类自然间断法,将 pH 范围划分为 $(7.5, 7.8)$ 、 $[7.8, 8.2)$ 、 $[8.2, 8.5)$ 3 个级别。

(2) 多维空间插值分析。基于 Arcgis10.2,绘制研究区土壤盐碱程度的二维空间分布图。三维反距离权重插值法是二维反距离权重插值模型和方法在三维空间中的扩展,其基本原理是两个物体之间距离越近,性质就越相似^[41]。根据本研究团队基于电导率建立的盐分解译模型,计算出各层土壤含盐量,运用 GMS10.4 软件,构建三维网格,在三维空间下利用反距离权重法进行土壤含盐量空间插值。二维、三维插值结果均以训练数据集与验证数据集(样本量比例为 $8:2$) 进行交叉验证,并采用均方根误差(RMSE)、实测值与预估值间的决定系数(R^2) 对插值精度进行评价, RMSE 越小、 R^2 越大,则说明预测的精度越高^[25]。

(3) 相关分析与因子探测分析。综合相关系数法和因子探测法的优势,进行风险因子综合权重的确定。相关系数法主要考虑了盐渍化影响因素与表层土壤含盐量之间的线性相关关系,而因子探测分析法可以度量自变量与因变量之间的关联性,既包括线性部分、也包括非线性部分,这为综合二者确定影响因子权重提供了理论依据。

(4) 多因素综合指数法。构建土壤盐渍化风险综合评价指数(Comprehensive score of soil salinization risk) CR^[42]:

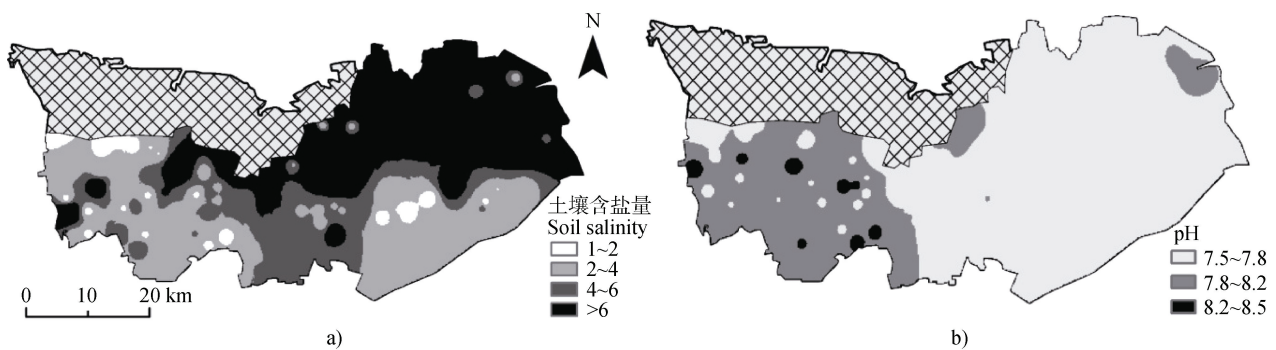
$$CR = \sum (K_i \times Q_i) \quad (1)$$

式中, K_i 代表各影响因素权重, Q_i 代表各影响因素的值。

表 1 盐渍化风险评价指标数据获取

Table 1 Data acquisition of salinization risk evaluation indexes

风险评价指标 Evaluation index	简称 Abbreviation	数据来源 Data sources	获取方法 Acquisition method	数据类型 Data type	数据属性 Data properties	参考文献 References
有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	S_om	采样测定	空间内插	矢量数据	逆向	-
土壤质地 Soil texture	S_tex	采样测定	空间内插	矢量数据	适度	-
中层土壤盐分 Salinity of middle soil/ (g·kg ⁻¹)	S_mid	采集解译	空间内插	矢量数据	正向	-
底层土壤盐分 Salinity of bottom soil/ (g·kg ⁻¹)	S_bot	采集解译	空间内插	矢量数据	正向	-
地下水矿化度 Groundwater mineralization/ (g·L ⁻¹)	W_min	监测资料	空间内插	矢量数据	正向	[36-37]
地下水埋深 Groundwater depth/ m	W_dep	监测数据	空间内插	栅格数据	逆向	-
距渤海距离 Distance/ m	Dis	遥感数据	空间内插	栅格数据	逆向	[22]
高程 Altitude/ m	DEM	遥感数据	遥感反演	栅格数据	逆向	-
坡度 Slope/%	S_slo	遥感数据	遥感反演	栅格数据	逆向	[31]
植被覆盖度 Vegetation coverage	FVC	遥感数据	遥感反演	栅格数据	逆向	[38]
平均降雨量 Average precipitation/%	A_Pre	遥感数据	空间内插	栅格数据	逆向	-
地表蒸散量 Surface evapotranspiration/mm	ET	遥感数据	遥感反演	栅格数据	正向	[30]



注: a) 表层土壤含盐量, b) pH。Note: a) Salt salinity of top soil, b) pH.

图 2 土壤盐渍化空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil properties

为保证 CR 值的可靠性, 对其进行标准化处理^[31]:

$$CR' = \frac{(CR - CR_{\min})}{(CR_{\max} - CR_{\min})} \quad (2)$$

式中, CR' 表示归一化后的土壤盐渍化综合评价指数, CR_{max}、CR_{min} 分别代表土壤盐渍化综合评价指数的最大值、最小值。

2 结果与讨论

2.1 土壤盐渍化描述性统计特征

土壤含盐量、pH 的描述性统计结果见表 2。表层土壤含盐量范围为 1.06~22.72 g·kg⁻¹, 均值为 5.84 g·kg⁻¹, 研究区土壤整体属于重度盐渍化; pH

变化范围为 7.51~8.50, 均值为 7.82, 区域土壤呈弱碱性。土壤含盐量、pH 的变异系数分别为 91.27%、2.92%, 分属于中等变异和弱变异。

基于 EC110 电导率仪所测电导率建立土壤电导率 EC₀ (uS·m⁻¹) 与含盐量 S_t (g·kg⁻¹) 间的关系方程^[22]:

$$S_t = 0.001EC_0 + 0.4244, n=51, R^2=0.851 \quad (3)$$

通过式 (3) 计算出 2.5、7.5、15.0、22.5、30.0、37.5、45.0、52.5 cm 8 个层次的土壤含盐量。各层土壤含盐量的均值范围介于 4.99 g·kg⁻¹~6.86 g·kg⁻¹ 之间, 均属于重度以上盐渍化; 变异系数介于 82.01%~100.32% 之间, 2.5 cm 层属于强变异, 7.5cm~52.5cm 各层属于中等变异。

表 2 土壤盐渍化描述性统计特征

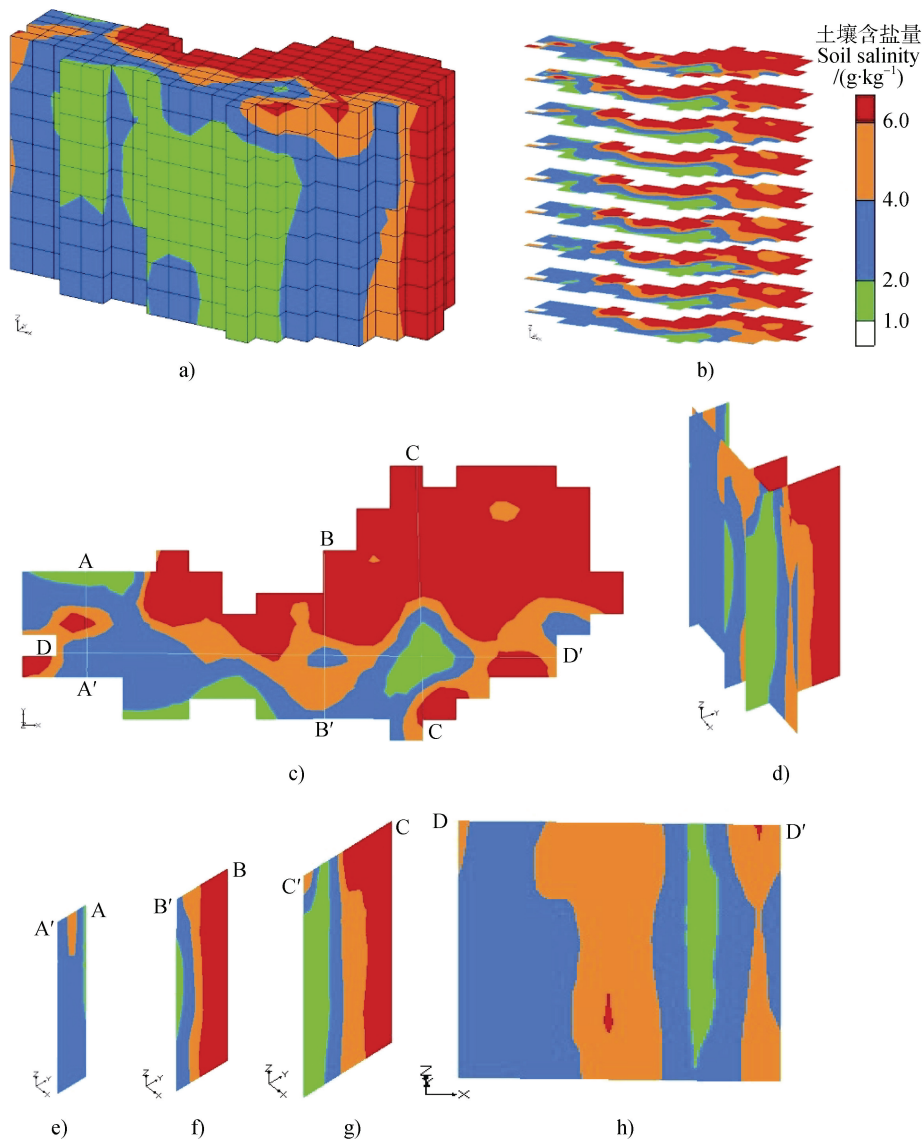
Table 2 Descriptive statistical analysis of soil salinization

土壤属性	土层深度	样本数	最小值	最大值	平均值	方差	标准差	峰度	偏度	变异系数
Soil properties	Layer depth /cm	Sample size	Min	Max	Average	Variance	SD	Kurtosis	Skewness	CV/%
			/ (g·kg ⁻¹) / (g·kg ⁻¹) / (g·kg ⁻¹)							
土壤含盐量	0~20	86	1.06	22.72	5.84	28.45	5.33	1.50	1.49	91.27
Soil salinity / (g·kg ⁻¹)	0~2.5	86	1.02	26.72	6.86	47.31	6.88	0.93	1.36	100.32
	2.5~7.5	86	1.04	25.22	5.91	30.38	5.51	2.69	1.69	93.34
	7.5~15.0	86	1.07	25.92	5.13	25.17	5.02	4.59	2.07	97.84
	15.0~22.5	86	1.00	24.67	5.16	24.13	4.91	4.58	2.08	95.13
	22.5~30.0	86	1.03	23.22	4.99	20.07	4.48	4.50	2.04	89.74
	30.0~37.5	86	1.00	29.42	5.29	25.05	5.00	7.70	2.49	94.65
	37.5~45.0	86	1.07	22.02	5.20	18.40	4.29	3.74	1.89	82.42
	45.0~52.5	86	1.06	22.32	5.07	17.29	4.16	5.45	2.16	82.01
pH	0~20	86	7.51	8.50	7.82	0.05	0.23	1.41	1.49	2.92

2.2 土壤盐渍化空间变异特征

2.2.1 土壤盐渍化二维分布特征 图 2a 为研究区表层土壤盐分空间分布图, 根据不同含盐量的盐渍化程度分级, 盐土区域 (表层土壤含盐量 ≥ 6 g·kg⁻¹) 主要分布在研究区北部、东北部, 呈面状分布; 重度盐渍化区域 (含盐量 4~6 g·kg⁻¹) 主要分布于研究区中南部, 与盐土区域紧邻, 呈条带状分布; 据现场调查统计资料, 盐土与重度盐渍土区域荒地较多, 主要植物类型为芦苇、碱蓬、马绊草、怪柳, 长势较差, 零星伴有耕地种植小麦, 但长势差, 麦田斑块状缺苗

情况较普遍; 中度盐渍化区域 (含盐量 2~4 g·kg⁻¹) 主要分布在研究区西部、东南部; 轻度盐渍化区域 (含盐量 1~2 g·kg⁻¹) 则零星分布于研究区西部、中东部地势较高、灌溉条件较好的局部地区。图 2b 为研究区 pH 分布图, 可以看出, pH 在 7.5~7.8 的区域主要分布在研究区中部、东部; 7.8~8.2 的区域主要分布于研究区西部; 大于 8.2 的区域零星分布于研究区西部。综合而言, 土壤含盐量自南向北呈逐渐升高趋势, 滨海区域盐渍化程度高于内陆, 从空间分布上看, 土壤“盐化”与“碱化”整体上呈负相关。



注: a)土壤盐分三维分布(0~52.5cm), b)各层土壤盐分分布, c)~h)典型截面土壤盐分三维空间分布。Note: a)Three-dimensional distribution of soil salt (0~52.5cm), b)Distribution of soil salt in each layer, c)~h)Three-dimensional distribution of soil salt in typical sections.

图3 研究区土壤盐分三维空间分布

Fig. 3 Three-dimensional spatial distribution of soil salinity in the study area

不同程度盐渍化面积存在显著差异。盐土面积为 870.3km², 占研究区总面积的 42.49%; 重度盐渍土面积为 425.9 km², 占 20.79%; 中度盐渍土面积为 688.7 km², 占 33.63%; 轻度盐渍土面积最小, 占 3.09%。

pH 7.5~7.8 的弱碱化区域面积为 1 233 km², 占研究区总面积的 60.21%; 7.8~8.2 的轻度碱化区域面积为 799.8 km², 占 39.05%; 8.2~8.5 的中度碱化面积最小, 仅占 0.74%。

二维反距离权重插值法交叉检验结果表明, 研究区土壤含盐量的 RMSE 为 0.436 g·kg⁻¹, 决定系数 R^2 为 0.761, 整体插值精度较高, 能够反映研究区盐分二维空间分布状况。

2.2.2 土壤盐渍化三维空间特征 利用 GMS10.4 软件对土壤含盐量进行三维 IDW 插值, 结果见图 3。

由图 3b 可以看出, 研究区土壤含盐量剖面类型较为复杂, 整体以均质型为主, 局部存在表聚型、

两端集聚型，总体呈现 3 种剖面类型共存的复杂特征^[43]。为进一步可视化分析研究区盐分割面分布特征，依据研究区土壤盐分的空间总体特征，利用 GMS 的 Create cross section 工具，重点剖析了研究区 4 个典型截面：A~A'（新户镇北部-南部）、B~B'（刁口乡-河口街道-六合街道）、C~C'（仙河镇-孤岛镇）、D~D'（新户镇-义和镇-河口街道-仙河镇）的盐分割面分布情况，结果如图 3c~图 3h。A~A' 截面，土壤盐分整体表现为均质型分布特征，中部存在局部表聚。B~B' 截面，刁口乡、河口街道中部剖面呈均质型分布特征，六合街道南部表层、底层土壤盐分高于中层，剖面呈两端集聚型分布，该剖面同时显示由沿海到内陆土壤盐分总体上呈逐渐降低的趋势。C~C' 截面，仙河镇土壤盐分整体呈均质型分布特征，孤岛镇西南部（C' 附近）表层土壤盐分明显高于中层、底层，呈表聚型分布。D~D' 截面，新户镇西南部、义和镇中部整体呈均质型分布，河口街道西南部呈表聚型分布，仙河镇西南部、东南部整体呈均质型分布，东南部局部存在两端集聚型分布。

三维反距离权重插值交叉检验结果表明，研究区土壤含盐量 RMSE 值为 $0.328 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， R^2 为 0.802。整体而言，三维反距离权重插值的 RMSE 值低于二维，但其 R^2 值高于二维，说明三维反距离权重插值整体预测精度高于二维反距离权重插值。这是由于

二维反距离权重插值只考虑了同一表面不同点之间的相互作用程度，而三维反距离权重插值不仅考虑同一平面不同点之间的相互作用关系，还考虑了上下层样点间的相互作用关系^[44]。

2.3 影响土壤盐渍化风险的因素

(1) 土壤表层盐分与风险因素的相关性。将 S_{om} 、 S_{tex} 、 S_{mid} 、 S_{bot} 、 W_{min} 、 W_{dep} 、Dis、DEM、 S_{slo} 、FVC、A_Pre、ET 与 S_{top} 进行相关性分析，解释风险评价指标与盐渍化状况的赋存关系。表层土壤含盐量 (S_{top}) 与中层土壤含盐量 (S_{mid})、底层土壤含盐量 (S_{bot}) 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.79、0.76；与植被覆盖度 (FVC)、高程 (DEM)、地下水埋深 (W_{dep})、距渤海距离 (Dis) 呈极显著负相关，相关系数分别为 0.45、0.38、0.37、0.31；与土壤质地 (S_{tex})、蒸散量 (ET) 呈显著负相关，相关系数分别为 0.22、0.25。风险评价指标与表层土壤含盐量相关性 (取绝对值后) 从大到小依次为 $S_{mid} > S_{bot} > FVC > DEM > W_{dep} > Dis > ET > S_{tex} > A_{pre} > W_{min} > S_{slo} > S_{om}$ 。

(2) 土壤盐渍化风险因素影响。以 S_{top} 为因变量， S_{om} 、 S_{tex} 、 S_{mid} 、 S_{bot} 、 W_{min} 、 W_{dep} 、Dis、DEM、 S_{slo} 、FVC、A_pre、ET 为自变量，分别确定自变量与因变量的影响力值。表 3 为因子探测分析结果，中层土壤含盐量对表层土壤

表 3 盐渍化风险因素影响力

Table 3 Influence of salinization risk factors

风险因素	影响力值 q	排序	风险因素	影响力值 q	排序
Risk factor	Influence value	Rank	Risk factor	Influence value	Rank
S_{mid}	0.677	1	S_{tex}	0.176	7
S_{bot}	0.597	2	W_{dep}	0.163	8
FVC	0.401	3	S_{om}	0.139	9
ET	0.278	4	A_pre	0.128	10
W_{min}	0.251	5	DEM	0.127	11
Dis	0.208	6	S_{slo}	0.095	12

盐分影响力最大， q 值为 0.677；底层土壤含盐量影响力次之， q 值为 0.597；坡度影响力最小， q 值为 0.095；影响力值从大到小依次为： $S_{mid} > S_{bot} > FVC > ET > W_{min} > Dis > S_{tex} > W_{dep} > S_{om} > A_{pre} > DEM > S_{slo}$ 。

2.4 土壤盐渍化风险综合评价

(1) 风险因素权重确定。风险因素在土壤盐渍化风险总体构成中的作用大小称为风险权重^[45]。盐渍化风险等级评价时，首先考虑以上 12 个风险因素的权重。为最大程度减少人为主观因素对评价结果

的干预，兼顾表层土壤盐分与影响因素间的线性及非线性相关关系，本文采用影响力值与相关系数法综合构建风险因素权重（表4）。中层土壤含盐量对盐渍化风险影响程度最大，其综合权重为0.201；底层土壤含盐量次之，综合权重为0.185；坡度影响程度最小。风险因素综合权重从大到小依次为： $S_{mid} > S_{bot} > FVC > ET > W_{dep} > Dis > DEM > W_{min} > S_{tex} > A_{pre} > S_{om} > S_{slo}$ 。

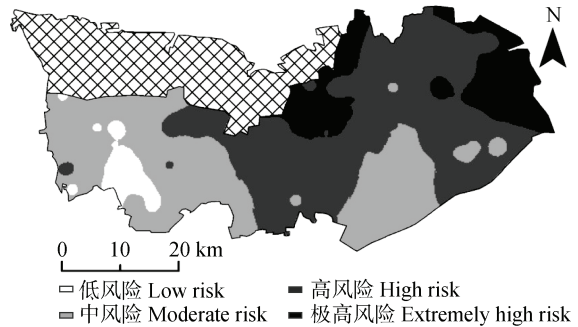
表4 风险因素综合权重

Table 4 Comprehensive weight of risk factors

风险因素 Risk factor	影响力权重 Weight of influence		相关系数权重 Weight of correlation coefficient		综合权重 Comprehensive weight	
	影响力 Influence	权重 Weight	相关系数 Correlation coefficient	权重 Weight	综合权重 Comprehensive weight	排序 Ranking
S_{mid}	0.677	0.209	0.790	0.194	0.201	1
S_{bot}	0.597	0.184	0.760	0.187	0.185	2
FVC	0.401	0.124	-0.450	0.117	0.117	3
ET	0.278	0.086	-0.250	0.073	0.074	4
W_{dep}	0.163	0.050	-0.370	0.071	0.071	5
Dis	0.208	0.064	-0.310	0.076	0.070	6
DEM	0.127	0.039	-0.380	0.093	0.066	7
W_{min}	0.251	0.078	0.170	0.042	0.060	8
S_{tex}	0.176	0.054	-0.220	0.054	0.054	9
A_{pre}	0.128	0.039	-0.190	0.047	0.043	10
S_{om}	0.139	0.043	-0.073	0.018	0.030	11
S_{slo}	0.095	0.030	-0.110	0.028	0.029	12

(2) 土壤盐渍化风险。通过式(1)计算得出土壤盐渍化风险综合评价指数后进行标准处理(CR')。根据研究区实际情况，将土壤盐渍化风险等级划分为低风险(CR'<0.1)、中风险(CR'0.1~0.3)、高风险(CR'0.3~0.5)以及极高风险(CR'>0.5)四个等级。为可视化盐渍化风险区域，对CR'进行反距离权重插值，得到研究区土壤盐渍化风险等级分布图(图4)，不同区域盐渍化风险程度存在显著差异。极高风险区域的面积为315.4 km²，占研究区面积的15.4%，主要分布于研究区中北部、东北部区域，该区濒临渤海，长期受海水浸渍、地下水矿化度高，导致中、底层土壤含盐量高，同时地下水埋深多小于1 m，为盐分自下而上运移创造了有利条件；高风险

区域面积为929.8 km²，占研究区面积的45.40%，主要分布于研究区中部及东北部区域，呈条带状分布，与极高风险区域紧邻；中风险区的面积为725 km²，占研究区面积的35.40%，主要分布于研究区西部、东南部，呈面状分布；低风险区面积为77.8 km²，占研究区面积的3.82%，主要分布于研究区西南部，该处地势较高，植被覆盖较好，盐渍化风险较小。



注：低风险 CR'<0.1，中风险 CR'0.1~0.3，高风险 CR'0.3~0.5，极高风险合计 CR'>0.5。Note: Low risk CR'<0.1; Moderate risk CR'0.1~0.3; High risk CR'0.3~0.5; Extremely high risk CR'>0.5.

图4 研究区土壤盐渍化风险分布

Fig. 4 Soil salinization risk distribution in the study area

(3) 盐渍化风险模型精度。表层土壤盐分是盐渍化最直观的表现形式，将其与土壤盐渍化风险评价指数的相关性分析，可用于该模型精度的评价，验证该模型的准确性。风险综合评价指数与表层土壤盐分二者的皮尔逊相关系数为0.735，呈极显著正相关，表明了评价模型的可信度较高，可以应用于滨海区土壤盐渍化风险预测与防控中。

3 讨论

滨海区土壤盐渍化危害是制约其农业生产的主要因素，明晰其空间分布特征、预测其风险分布状况，可为今后盐碱地改良利用和分区精准管理提供基础资料与实践依据。河口区地处黄河北岸、渤海之滨、黄河三角洲的最前沿，土壤盐渍化受中、底层土壤含盐量、植被覆盖度、蒸散量等多种因素共同影响，使得研究区土壤含盐量空间分异特征复杂^[46]，不同区域盐渍化风险程度不尽相同。如何降低盐渍化风险、对不同风险程度盐渍化区域进行分区精确管控是滨海区农业高效发展所面临的现实问

题。本文研究结果表明河口区盐渍土类型以重度盐渍土为主，土壤“盐化”与“碱化”空间分布整体呈负相关，盐渍土剖面分布类型呈表聚型、均质型与两端集聚型共存的复杂特征，盐渍化风险主要受中层、底层土壤含盐量以及植被覆盖度驱动，以高风险区域为主。

研究区土壤含盐量与盐渍化风险分布表现出整体一致、局部突变的空间分布格局。土壤含盐量 $\geq 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域主要风险类型为极高风险与高风险，存在该差异的原因主要是极高风险区域主要位于滨海边缘，中、底层土壤受咸水长期浸渍影响，导致二者含盐量明显高于其他区域（图 2）。同时，极高风险地区植被覆盖程度低（ $\text{FVC} < 0.4$ ），不能有效促进表层土壤结构性改善，提高土壤水分入渗能力，减少地表水分蒸发^[47]，而地下水埋深浅（小于 1m）为水分大量快速蒸发提供有利条件，盐分随水分通过土壤毛细作用向上运移，最终在表层形成积聚。这是其有别于高风险区域的主要影响因素，与吕真真等^[48]对黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征相关关系的研究结果相一致。其次，该区域位于研究区高程最低处，且距离渤海最近，地下水矿化度高，西部、南部表层土壤盐分也可能随地表径流迁移至此，造成盐分累积，这与王卓然等^[49]对黄河三角洲垦利区土壤盐渍化一定程度上受距渤海距离影响的研究结果一致。总之，该区在多重因素交互作用影响下成为极高风险区。

总体而言，研究区土壤盐渍化风险严重，应采取有效措施降低盐渍化风险。对于极高风险区域应以预防为主，在保护利用好现有农田的同时，限制过度过快开发，倡导生态利用为主；现有农田可推广秸秆还田、机械深耕翻，以切断土壤毛细管，增强土壤保水能力；针对该区光板地较多的实际，应加大本土耐盐碱植物资源的筛选培植^[50]，快速增加植被覆盖程度，有效减少水分蒸发，土地整治中可不断改进暗管排盐、生态保水等措施，有效降低地下水位。对于高风险区域应以控制为主，在搞好预防措施基础上，不断改进灌溉方式，减少大水漫灌，防止抬高地下水位，加重盐渍化风险；改进盐碱农田喷灌、滴灌等节水灌溉技术的节水控盐效果，提高水肥利用效率。对于中、低风险区域应以优化改良为主，进一步优化排灌系统，加强淡水的开源节流，以增强调盐抑碱效果，保障农田提质增效；同

时，改进长效管护机制，强化土壤盐碱水肥动态监测和精准调控，促进盐渍土资源高效利用、盐碱农业高质量发展。

4 结 论

通过对东营市河口区黄河故道流域土壤盐渍化程度进行多维空间分析，选取盐渍化风险影响因子进行风险评价，明晰了目前流域盐渍化程度，预测了盐渍化风险等级并提出分区管控技术建议。研究区土壤整体属于重度盐渍化，呈弱碱性；二维空间上，土壤含盐量自南向北呈逐渐升高趋势，土壤“盐化”与“碱化”分布特征整体呈负相关；三维空间上，土壤盐剖面分布以均质型为主，呈表聚型、均质型、两端集聚型共存的复杂状况；研究区盐渍化风险以中、高风险为主，集中分布于西部、中部、东北部及东南部，占研究区总面积的 80.80%，是今后该区防控盐渍化灾害的关键。

参考文献 (References)

- [1] Shrivastava P, Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22 (2): 123—131.
- [2] Xiao Y, Zhao G X, Li T, et al. Soil salinization of cultivated land in Shandong Province, China-Dynamics during the past 40years[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30 (4): 426—436.
- [3] Li X Y, Cui J Q, Shi H B, et al. Analysis of soil salinization risk and groundwater environment based on indicator kriging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (8): 297—306. [李仙岳, 崔佳琪, 史海滨, 等. 基于指示 Kriging 的土壤盐渍化风险与地下水环境分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52 (8): 297—306.]
- [4] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, Eastern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19 (11): 3699—3707.
- [5] Ashraf M. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27 (1): 84—93.
- [6] Spanò C, Balestri M, Bottega S, et al. *Anthemis maritima* L. in different coastal habitats: A tool to explore plant plasticity[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 129: 105—111.

- [7] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2019, 349: 25—35.
- [8] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 10—27. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 10—27.]
- [9] Guo S S, Wang Y H. Salinity analysis of sandy soil in Ebinur Lake Basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(5): 196—199, 219. [郭双双, 王勇辉. 艾比湖流域风沙土盐分特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 196—199, 219.]
- [10] Li J H, Gao M X. Temporal and spatial characteristics of salinization of coastal soils in the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1458—1465. [李俊翰, 高明秀. 黄河三角洲滨海土壤盐渍化时空演化特征[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1458—1465.]
- [11] Yang F, Yang F, Huang L M, et al. Characteristics and mechanisms of the accumulation of salts and calcium carbonate in sediment-derived soils of the Gurinai Playa[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 393—404. [杨帆, 杨飞, 黄来明, 等. 古日乃湖盆沉积物发育土壤盐分与碳酸钙积累机制[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 393—404.]
- [12] Li Y L, Zhao G X, Chang C Y, et al. Soil salinity retrieval model based on OLI and HSI image fusion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 173—180. [厉彦玲, 赵庚星, 常春艳, 等. OLI与HSI影像融合的土壤盐分反演模型[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 173—180.]
- [13] Bian L L, Wang J L, Liu J, et al. Spatiotemporal changes of soil salinization in the Yellow River Delta of China from 2015 to 2019[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 822.
- [14] Cui K, Zhao G X, Wang Z R, et al. Multi-scale spatial variability of soil salinity in typical fields of the Yellow River Delta in summer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1451—1458. [崔昆, 赵庚星, 王卓然, 等. 黄河三角洲夏季典型田块土壤盐分的多尺度空间变异[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1451—1458.]
- [15] Zhang Z X, Song Y T, Zhang H Z, et al. Spatiotemporal dynamics of soil salinity in the Yellow River Delta under the impacts of hydrology and climate[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1393—1405. [张子璇, 宋雨桐, 张惠中, 等. 水文气候影响下黄河三角洲土壤盐分时空动态[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1393—1405.]
- [16] Qiao X J, Shi J C, Tan L L, et al. Multi-scale spatial distribution characteristics of soil salinity in root-zone in film-mulched drip-irrigated cotton fields in anjihai irrigation zone, Xinjiang[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1202—1213. [乔学瑾, 石建初, 谭丽丽, 等. 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1202—1213.]
- [17] Fan X M, Liu G H, Liu H G. Evaluating the spatial distribution of soil salinity in the Yellow River Delta based on kriging and cokriging methods[J]. *Resources Science*, 2014, 36(2): 321—327. [范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于Kriging和Cokriging方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 321—327.]
- [18] Louati D, Majdoub R, Rigane H, et al. Effects of irrigating with saline water on soil salinization (eastern Tunisia) [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(7): 3793—3805.
- [19] Hu K L, Li B G, Lü Y Z, et al. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 132—137. [胡克林, 李保国, 吕贻忠, 等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较[J]. *环境科学*, 2004, 25(3): 132—137.]
- [20] Zhao L, Guo Z Y, Zhou G H, et al. Comparative study of methods for spatial distribution prediction of soil salinity in coastal areas[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(7): 720—728. [赵林, 郭紫伊, 周国华, 等. 滨海地区土壤盐分空间分布预测方法比较研究[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(7): 720—728.]
- [21] Mu Y S E · R Z, Wang X M. Spatial variation characteristics of soil water and salt in cultivated layer in the delta oasis of the Weigan-kuqa Rivers[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(6): 39—46. [穆耶赛尔·肉孜, 王雪梅. 渭-库绿洲耕层土壤水盐空间分异特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(6): 39—46.]
- [22] Wang Z R, Zhao G X, Gao M X, et al. Spatial variation of soil water and salt and microscopic variation of soil salinity in summer in typical area of the Yellow River Delta in Kenli County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1040—1049. [王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1040—1049.]
- [23] Duan M Q, Zhang X G, Wang B. Prediction method of spatial distribution for soil salinity in typical areas of the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(8): 243—250. [段梦琦, 张晓光, 王豹. 黄河三角洲典型区土壤盐分空间分布预测方法研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(8): 243—250.]
- [24] Xu D, Liu C H, Cai T Y, et al. 3D spatial distribution

- characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (12): 157—163. [徐丹, 刘昌华, 蔡太义, 等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46 (12): 157—163.]
- [25] Wu Y K, Liu G M, Yang J S, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (3): 100—106, 296. [吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (3): 100—106, 296.]
- [26] Liu X L, Peng J, Feng C H, et al. Inversion model for soil conductivity in cotton field in South Xinjiang based on EM38-MK2 data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (3): 646—655. [刘新路, 彭杰, 冯春晖, 等. 基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 646—655.]
- [27] Yun A P, Ju Z S, Hu K L, et al. Three-dimensional spatial interpolation of soil salinity based on inverse distance weighting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (12): 148—156, 172. [云安萍, 鞠正山, 胡克林, 等. 基于距离反比法的土壤盐分三维空间插值研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46 (12): 148—156, 172.]
- [28] Li H Y, Shi Z, Tang H L. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary kriging method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (2): 359—363. [李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (2): 359—363.]
- [29] Liu G M, Wu Y K, Yang J S, et al. Regional 3-D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (7): 78—82, 66. [刘广明, 吴亚坤, 杨劲松, 等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44 (7): 78—82, 66.]
- [30] Ilyas N, Shi Q D, Abdulla A, et al., et al. Quantitative evaluation of soil salinization risk in Keriya Oasis based on grey evaluation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (8): 176—184. [依力亚斯江·努尔麦麦提, 师庆东, 阿不都拉·阿不力孜, 等. 灰色评估模型定量评价于田绿洲土壤盐渍化风险[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (8): 176—184.]
- [31] Wang Z, Zhang F, Zhang X L, et al. Quantitative evaluation of spatial and temporal variation of soil salinization risk using GIS-based geostatistical method[J]. Remote Sensing, 2020, 12 (15): 2405.
- [32] Seydehmet J, Lü G H, Abliz A, et al. Irrigation salinity risk assessment and mapping in arid oasis, northwest China[J]. Water, 2018, 10 (7): 966.
- [33] Wang J F, Liao Y L, Liu X. Course of spatial data analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019. [王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [34] Xie L H. Soil carbon pools structure and nutrient characteristics of different land use patterns in the Yellow River Delta[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017. [解璐晗. 黄河三角洲不同土地利用方式土壤碳库结构和养分特性[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.]
- [35] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [36] Zhang C R. Agricultural Journal of Hekou District [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020 [张成儒. 河口区农业志[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.]
- [37] Zhou Z M, Zhang G H, Wang J Z, et al. Risk assessment of soil salinity by Multiple-variable Indicator Kriging in the low plain around the Bohai Sea[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (10): 1144—1151. [周在明, 张光辉, 王金哲, 等. 环渤海低平原区土壤盐渍化风险的多元指示克立格评价[J]. 水利学报, 2011, 42 (10): 1144—1151.]
- [38] Du B C X, Cheng Y X, Wu L. Analysis of negative correlation between vegetation and soil salinization in Junggar Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (23): 9364—9376. [杜秉晨曦, 程勇翔, 吴玲. 准噶尔盆地植被与土壤盐渍化关联性变化趋势分析[J]. 生态学报, 2021, 41 (23): 9364—9376.]
- [39] Wu C W, Chen X B, Wang S T, et al. Characteristic research on the soil salinity in coastal cotton field of the Yellow River Delta[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32 (5): 149—153. [吴从稳, 陈小兵, 王松涛, 等. 黄河三角洲滨海棉田土壤盐分特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32 (5): 149—153.]
- [40] Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected soils in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. [王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [41] Song H F, Xin L J. Differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land use intensity in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37 (16): 212—222, 303. [宋恒飞, 辛良杰. 中国耕地利用强度分化特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (16): 212—222, 303.]
- [42] Mohanty M, Painuli D K, Misra A K, et al. Soil quality

- effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92 (1/2): 243—250.
- [43] Yao R J, Yang J S, Liu G M, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (6): 61—66. [姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22 (6): 61—66.]
- [44] Han J C, Li X M, Sun J H, et al. Research on three dimensional spatial distribution of soil salinity in a typical field of Lubotan area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29 (5): 847—854. [韩霁昌, 李晓明, 孙剑虹, 等. 卤泊滩典型田块土壤盐分三维空间分布研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29 (5): 847—854.]
- [45] Li Z Z, Li W D, Shi H H, et al. Gray model for ecological risk assessment and its application in salinization oasis agroecosystem[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22 (6): 617—622. [李自珍, 李维德, 石洪华, 等. 生态风险灰色评价模型及其在绿洲盐渍化农田生态系统中的应用[J]. *中国沙漠*, 2002, 22 (6): 617—622.]
- [46] Yao R J, Yang J S, Jiang L, et al. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (1): 56—65. [姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (1): 56—65.]
- [47] Zhao L P, Feng J, Wang Y, et al. Composition and distribution of soil salts in profiles of saline-sodic soil under different land use patterns[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (5): 904—911. [赵兰坡, 冯君, 王宇, 等. 不同利用方式的苏打盐渍土剖面盐分组成及分布特征[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (5): 904—911.]
- [48] Lü Z Z, Yang J S, Liu G M, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1377—1385. [吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1377—1385.]
- [49] Wang Z R, Zhao G X, Gao M X, et al. Characteristics of soil water and salt spatial variations in the spring season in typical Yellow River Delta areas of Kenli County, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32 (2): 154—161. [王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32 (2): 154—161.]
- [50] Xie X F, Pu L J, Shen H Y, et al. Dynamics and prediction of soil salinization parameters under the amelioration of heavy coastal saline-alkali land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (6): 1504—1516. [解雪峰, 濮励杰, 沈洪运, 等. 滨海重度盐碱地改良土壤盐渍化动态特征及预测[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6): 1504—1516.]

(责任编辑: 檀满枝)